

瑞浪超深地層研究所深度300mにおける耐久性に優れた溶液型グラウトの試験施工

延藤 遵^{1*}・辻 正邦²・草野 隆司³・見掛 信一郎⁴・神谷 晃⁴・石井 洋司⁴

¹清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3シーバンスS館）

²スウェーデン王立工科大学（SE-100 44 Stockholm, Sweden）

³清水・鹿島・前田特定建設工事共同企業体（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

⁴日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

*E-mail: nobuto@shimz.co.jp

瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事では、排水処理費等を考慮すると極力湧水を抑制することが望ましい。換気立坑の立坑深度460mまでは、セメント材料を用いたプレグラウティングにより湧水を抑制してきたが、今後の掘削の進展に伴う湧水圧の増大により、セメント材料が浸透しない微小亀裂からもある程度の湧水が発生することが懸念される。そこで、浸透性と耐久性に優れた特殊な溶液型グラウトを用いて、深度300mの水平坑道で試験施工を実施した。その結果、1Luを下回る透水場においても十分な湧水抑制効果を有することが確認された。さらに、グラウト注入区間に9MPa強の水圧を作用させても、水圧作用前後において顕著な透水性の変化は見られず、グラウトによる湧水抑制効果が保たれていることを確認した。

Key Words : colloidal silica, grouting, granite, inflow, Mizunami Underground Research Laboratory

1. はじめに

日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究の基盤となる深地層の科学的研究を目的として岐阜県瑞浪市において瑞浪超深地層研究所を建設中である（図-1参照）。同研究坑道を構成する2本の立坑のうち換気立坑（平成22年9月30日時点で約460mまで掘削完了）では電研式岩盤分類でCH級の良好な花崗岩中に位置しているが、花崗岩中に存在する透水性割れ目の存在により立坑掘削時には湧水が発生する。さらに、この地下水中には自然由来のふっ素とほう素が環境基準を

上回る濃度で含まれており、その処理費用の軽減も兼ねてセメント材料を用いたプレグラウティング（改良目標：グラウト改良部のルジオン値として2Lu以下（＝約 $2.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ））により湧水の発生を抑制¹⁾するとともに、適切に処理して近傍の河川に放流している。研究坑道の地下深部では、地下水中の塩化物イオン濃度が上昇すると予想されており、塩化物イオンを含んだ地下水の排水処理費用を考慮すると、今後の深部の掘削のためには湧水の発生量をさらに厳しく抑制することが望ましい。そこで、セメントグラウトに比べて微小な岩盤亀裂への浸透性が高く、高い湧水抑制効果が期待できる溶液型グラウトのうち、特に耐久性に優れたコロイダルシリカグラウト^{2,3)}（以下では溶液型グラウトと称す）を取り上げて、地下深部における岩盤グラウトへの適用性を調べるための試験施工を実施した。ここでは、その概要について報告する。

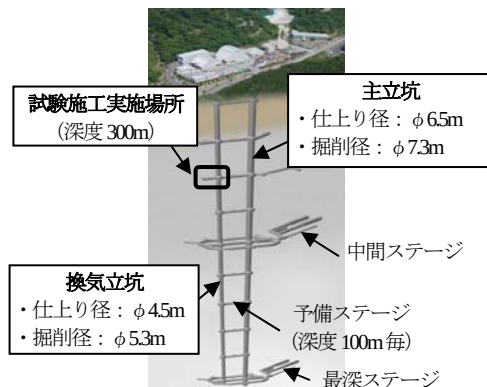


図-1 瑞浪超深地層研究所のレイアウト計画

2. 試験施工の概要

(1) 試験実施場所

試験施工は、換気立坑の深度300mに位置するボーリング横坑（図-1中の実線で囲んだ水平坑道）の妻部の小

段（段差＝1.3m）上に単管パイプ等で足場を組んで実施した（写真-1、写真-2）。このボーリング横坑を掘削する際には、事前に4本の探り削孔が実施されており、それぞれ21.4、0.52、0.38、0 L/分の湧水量が観測されている。湧水量と湧水圧から以下の式でLu値を換算して算定したところ（以下、換算Luと称す）、最大でも0.97 Luでありグラウト改良目標値（2Lu）以下であったため、グラウチングは実施していない。

$$\text{換算Lu} = \frac{0.98Q}{P \times L} \quad (1)$$

ここに、Q：湧水量（L/分）、P：湧水圧（MPa）
L：区間長（m）

岩盤等級は電研式岩盤分類でCH級であり、試験施工時には、坑道壁面からの顕著な湧水は確認されず、数か所の高角度の割れ目から最大1L/分程度の湧水が目視で確認された程度であった。ただし、小段全体から流下する湧水の状況を観察すると（目視で10L/分程度）、正確な位置は確認できなかったが小段の底盤部から数L/分程度の湧水が発生しているものと考えられたため、底盤部から下方向にグラウトを注入することとした。

(2) 使用材料

使用した溶液型グラウト材料はパーマロック Hi-R（強化土エンジニアリング）である。同製品は、シリカ濃度 30wt.%のコロイダルシリカ（商品名 Hi-シリカ）に無機塩である硬化促進剤を添加することによりゲル

化させるものである。硬化促進剤の添加量によりゲルタイムが数分から数時間の範囲で調整可能であり、グラウト液は弱アルカリ性（pH＝9～10）の無機物であるため環境にも優しい材料であると言える。さらに、従来の水ガラスに比べて、劣化因子であるアルカリをほとんど含まない上に、粒径が水ガラスの100倍程度（5～20nm）と比較的大きいため、溶解度が低く耐久性に優れている。今回の試験では、ゲルタイムを120分と180分の2種類に設定し、蛍光染料であるアミノG酸をトレーサーとして加えた（表-1）。なお、硬化促進剤は顆粒状であるため、コロイダルシリカに添加する前に水道水で溶解した。

(3) グラウト孔配置と試験フロー

パイロット孔を囲むように、1次孔を3孔、2次孔を3孔、孔間隔が先端で1.5m以下となるように配置した（図-2）。最初にパイロット孔を削孔し、湧水量・湧水圧測定、BTV観察、水押し試験を実施し、グラウト注入前の試験場所の水理場を確認した。次に、グラウト注入を2次に分割して実施し、各次の終了後に、パイロット孔の水押し試験を実施してグラウトによる改良効果を確認した。最後にパイロット孔において最大10MPaを目標に水圧を作用させて、高水圧に対するグラウト材の流出抵抗性を確認した（図-3）。なお、全孔をロータリーボーリングマシンで削孔した（孔径66mm、孔長6m）。

表-1 試験に使用した配合

ゲルタイム	Hiシリカ (L)	硬化促進剤 (kg)	水道水 (L)	アミノG酸* (L)	比重
180分	80	1.094	19.05	0.40	1.17
120分	80	1.250	19.37	0.01	1.17

*180分配合を注入した際にリークが発生したため、排水への影響を考慮して、アミノG酸の添加量を大幅に減らし、さらにゲルタイムを120分に変更している。

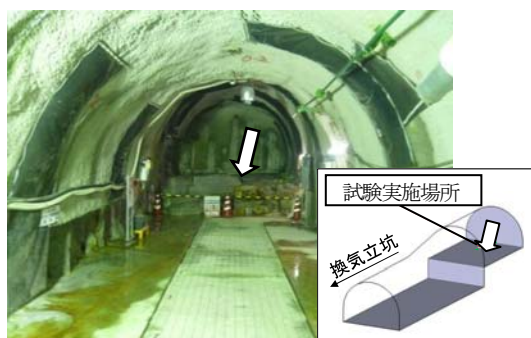


写真-1 試験実施場所（試験前、立坑側から撮影）



写真-2 施工試験状況（試験中、立坑側から撮影）

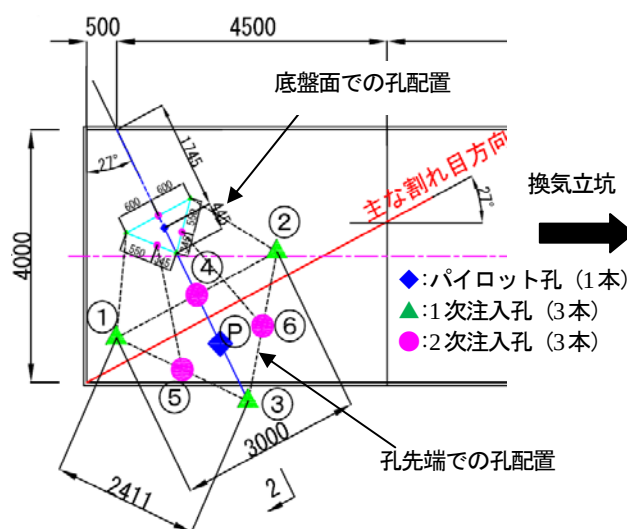


図-2 グラウト孔配置図（平面図）

(4) 事前調査の結果

パイロット孔削孔後に実施した湧水圧・湧水量測定の結果、湧水圧は0.8MPa、区間湧水量は表-2に示す通りであり、今回の試験対象区間としたボーリング深度3.0～6.0mにおいては5.5m以深から湧水が発生していることが判明した。ボーリングコアでは5.8m以深に高角度の割れ目が見られるため、この割れ目から湧水が発生した可能性が高い（写真-3）。一方、BTVでは装置の構造上、5.8m以深の観測はできないため、湧水を発生させるような割れ目は確認されていない。

また、水押し試験の結果、深度3.0～6.0m区間のルジオン値は0.29Luであり、今回の試験目的である1Lu以下の透水場でのグラウト改良効果を確認する試験場所としては適切であったと言える。

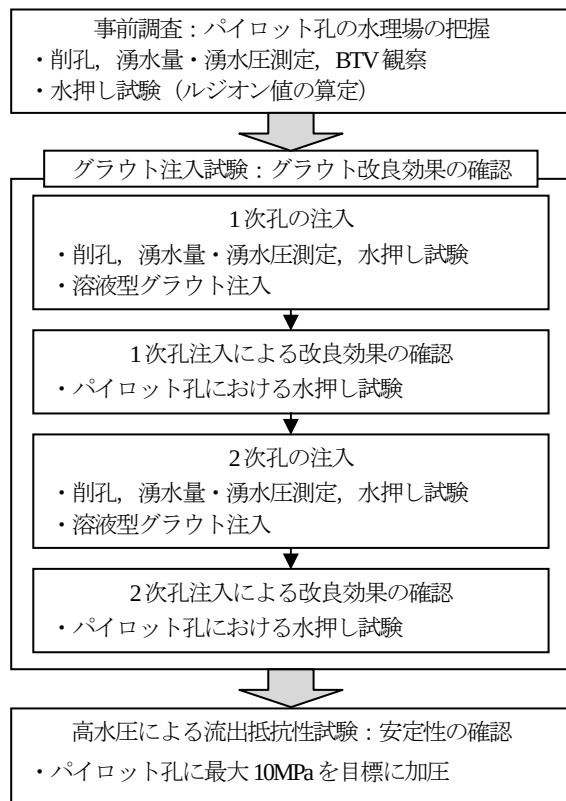


図-3 試験フロー図

表-2 パイロット孔の区間湧水量

測定区間	湧水量 (L/分)
1.0～2.0m	0.61
2.0～3.0m	0
3.0～4.0m	0
4.0～5.0m	0.04
5.0～5.5m	0.03
5.5～6.0m	0.68
合計	1.36

3. グラウト注入試験

(1) 試験に使用したグラウト設備

溶液型グラウトは、超微粒子セメント等に比べて、練混ぜが容易であるため、練混ぜにはハンドミキサーを使用した。注入に際しても小型のダイヤフラムポンプ（全長×幅×高さ：716×367×440(mm)、重量：90kg、写真-4）により注入可能であるため、注入設備はセメントグラウトに比べて、大幅にコンパクトになる。但し、低透水場を改良するためには、グラウト孔内に溜まった水を岩盤内に押し出すのに時間がかかるため、ゲルタイムを有する材料の場合は、ゲルタイムのロスにつながる。さらに、注入孔内の水により溶液型グラウトが希釈され、品質が低下するため、グラウト注入前に注入孔内に溜まった水を排水し、グラウト材で置換しておくことが望ましい。そこで、特殊な治具を製作して注入前に注入孔内の水をポンプにより排水し、グラウト材で置換した後に、グラウト注入を開始することにした（写真-5、図-4）。

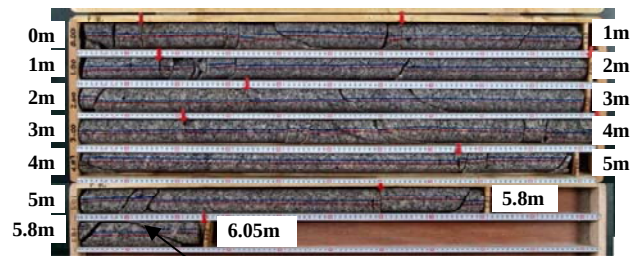


写真-3 パイロット孔のボーリングコア



写真-4 ダイヤフラムポンプ



写真-5 グラウト孔内の排水・置換状況

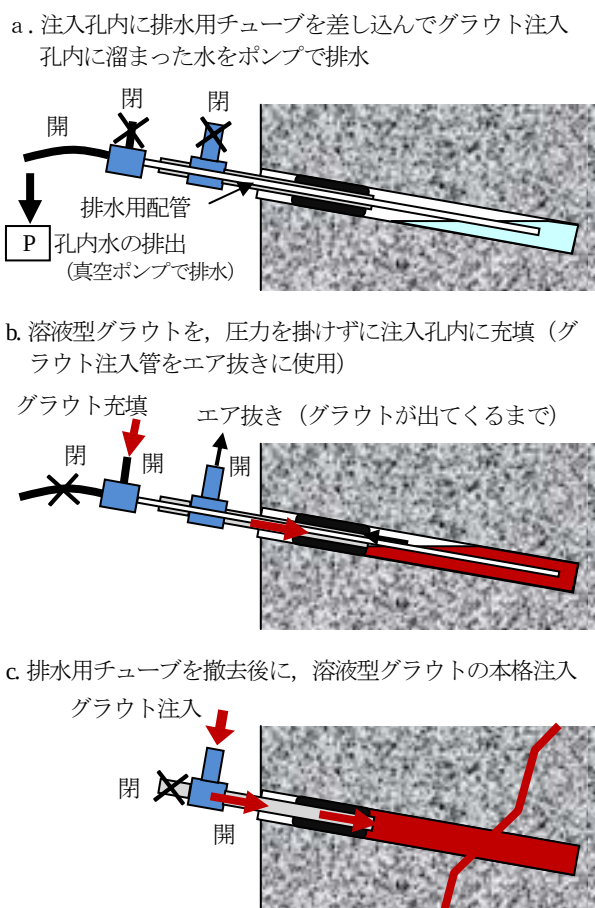


図-4 注入孔内の溜まり水の排水・置換方法

(2) グラウト注入管理方法

溶液型グラウトは、pHと温度によりゲルタイムが変動するため、品質管理として練混ぜ後にpHと液温を測定した。また、ゲルタイム確認用に少量のサンプルを採取し、強度確認用に3体の供試体を採取した。さらに、グラウト注入中はグラウト液温を継続して測定し、ポンプの稼働熱等によりグラウト液温が25℃を超える場合には、保冷材をグラウトタンク内に直接投入して液温の上昇を抑えた。

ゲルタイムと一軸圧縮強さの測定結果を表-3に示す。同表より、ゲルタイム、一軸圧縮強さともにバラツキが少なく良好な品質管理が出来たものと考えられる。

なお、グラウト停止基準は、以下のいずれかを満足する場合にグラウト注入を停止した。

<試験で採用したグラウト停止基準>

- ・ 注入時間が60分未満の場合：注入流量が0.0L/分に低減した状態が10分間継続
- ・ 注入時間が60分を超えた場合：注入流量が0.1L/分以下に低減した状態が10分間継続
- ・ 注入総量が規定量200Lに到達

(3) 試験結果

1次孔は3孔まとめて削孔して、水押し試験を実施した後に、Lu値の最も高い孔から孔番号3→1→2の順番でグラウトを注入した。2次孔は、孔番号4、6、5の順番で1孔ずつ削孔、水押し、グラウト注入を実施した。試験結果を表-4に、注入量を図-5に図示して示す。同図表において、104.5Lグラウト注入した1次孔-2から孔先端で1.5mしか離れていない2次孔-4においてルジオン値が0.42Luと高く、104.9Lもグラウトが注入出来ている。これは、2次孔-4は1次孔-2で捕捉していない新たな岩盤割れ目に交差したためであると考えられる。

パイロット孔における水押し試験結果は、グラウト注入前の0.29Luから、1次孔注入後に0.04Lu、2次孔注入後に0.0Luに低下しており、1Lu以下の低透水の岩盤においても十分な改良効果が確認された（図-6）。また、グラウト注入量はルジオン値に比例している（図-7）。

次に、ログデータの例として1次孔-2の注入圧とグラウト流量の経時変化を図-8に示す。今回の試験では、脈動の小さいダイヤフラムポンプを用いたため、注入圧力は安定しており、グラウト流量は滑らかに低減し、ほぼゲルタイム以内に注入が終了している。

表-3 現場での品質管理試験結果

注入孔番号	ゲルタイム(分)		一軸圧縮強さ (kN/m ²)		
	予想	現場測定値	σ_1	σ_7	σ_{28}
1次孔-2	120	110	—	39.5	56.4
1次孔-3	180	190	18.1	32.1	53.4
2次孔-4	120	110	20.9	40.8	56.3
2次孔-5	120	116	21.4	37.6	55.6
2次孔-6	120	117	21.9	40.5	55.1

表-4 グラウト注入試験結果

注入孔番号	注入順序	湧水量 (L/分)	Lu値	グラウト注入		
				配合	注入量	注入時間
1次孔-1	2	0.2	0.1	180分	13.6L	60分
1次孔-2	3	1.7	0.5	120分	104.5L	119分
1次孔-3	1	1.8	0.7	180分	156.0L	132分
2次孔-4	4	2.0	0.4	120分	104.9L	117分
2次孔-5	6	0.0	0.2	120分	15.0L	60分
2次孔-6	5	0.0	0.0	120分	1.4L	29分

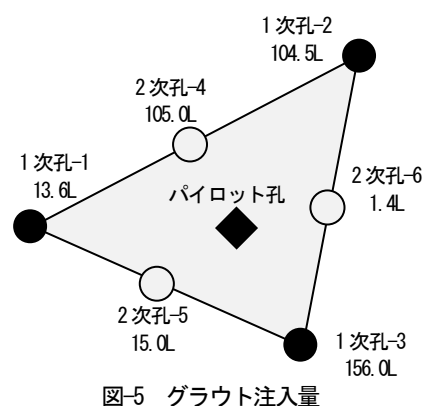


図-5 グラウト注入量

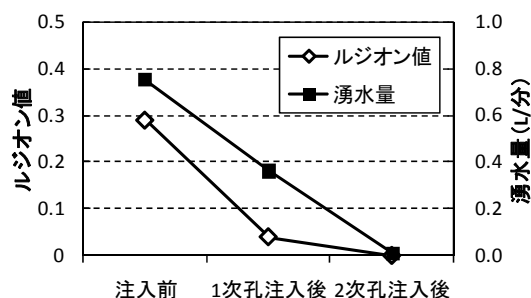


図-6 パイロット孔におけるルジオン値と湧水量

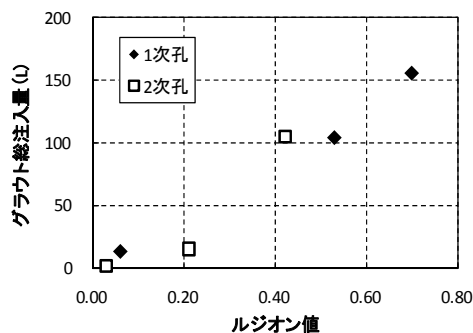


図-7 ルジオン値とグラウト注入量の関係

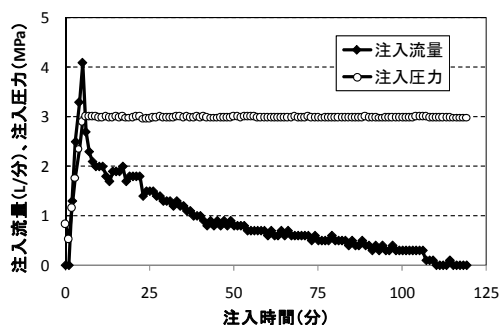


図-8 グラウトログデータ (1次孔-2)

4. 水圧による流出抵抗性試験

(1) 試験方法

パイロット孔の深度3mに超高压エアパッカー（最大膨張圧：12MPa，室内試験で12MPaまでの水圧に抵抗可能であることを確認済み）を設置し，2MPaから1MPaずつ段階的に昇圧し（3分間圧力を保持），グラウト改良区間に最大10MPaまで水圧を作用させることとした．注水には，高压ハイドロポンプ（最大圧力：19MPa）を使用し，流量測定は供給水の重量を電子秤で測定して流量を算定した（通常の電磁流量計では圧力が高すぎて測定できないため）．また，高压を作用させるため，安全を考慮してパッカーを支えるロッドをボーリングマシンに抱かせ，ボーリングマシンの浮きあがり防止用に底盤および天端から反力をとった（写真-6）．



写真-6 流出抵抗性試験の実施状況

(2) 試験結果

2MPaから3回の昇圧過程を実施した．表-5に試験概要を，図-9に各試験での注水圧と注水量の関係を示す．

1回目は，7MPaまで昇圧した際に，2次孔-4から注水のリークが見られ，注水量が急激に上昇した結果，ポンプの吐出量を超えたため昇圧不能となり試験を終了した．次に，パッカー設置深度を4mに変更して，2回目の昇圧を実施した結果，グラウト孔からのリークは発生しなかったが，5MPaまで昇圧した際に，注水量が急激に増加し，8.5MPaまで昇圧した際に，ポンプの吐出量が限界に達したため試験を終了した．3回目は，2回目と同条件にて昇圧した結果，5MPaまではほぼ同様な履歴を示したが，5MPa以降の注水量の増加は緩やかとなり9MPaまでは安定して昇圧可能であった．しかし，9.5MPaまで昇圧すると，ポンプの吐出量が限界に達したため圧力が不安定となり試験を終了した．なお，試験の前後でパイロット孔からの湧水量を測定した結果，最終的な湧水量は，流出抵抗性試験開始前の0.01L/分から試験終了時に0.13L/分に増加し，翌朝には0.10L/分に低減している（グラウト注入前の初期値は0.75L/分）．図-9において，5MPaの注水圧までは再現性が良いため，少なくとも5MPaの水圧に対しては溶液型グラウトは安定していると言えそうである．さらに，3回目に9MPa以上の水圧を作用させた後も，パイロット孔からの湧水量は初期値である0.75L/分に対して，0.10L/分まで低下した状態を維持しているため，グラウト材による湧水抑制効果はかなり保持されていると言える．なお，試験前後における湧水量の増加（0.01→0.10L/分）の要因がグラウト材の流出によるのか，岩盤割れ目の変形によるのかについては明確ではない．

一方，これまでに換気立坑における測定結果から導出した湧水圧 P_w (MPa) の予測式は以下の通りである．

$$p_w = (D - 100) \times 0.0085 \quad (2)$$

ここに， D ：深度 (m)

上式を用いると，湧水圧＝5MPaに対応する立坑深度は688mとなるため，少なくとも深度500m程度までは溶液型グラウトは適用可能であると言える．

表-5 流出抵抗性試験

試験回数	パッカー設置深度(m)	湧水量 (L/分)		最終注水圧 (MPa)
		開始時	終了後	
1回目	3.0	0.01	0.06	7.0
2回目	4.0	0.06	0.13	8.5
3回目	4.0	0.11	0.13*	9.5(9.0)

*翌朝には0.10L/分に減少

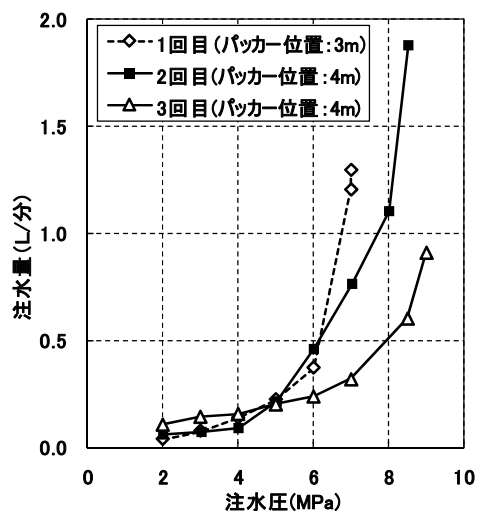


図-9 注水圧と注水量の関係

5. まとめ

今回、浸透性と耐久性に優れた溶液型グラウトを用いた試験施工の結果、以下が判明した。

- ・0.29Luという低透水場においても、溶液型グラウトにより湧水抑制効果が期待できること（これまでの換気立坑の工事実績では、0.5Lu以下では、超微粒子セメントでは十分な改良効果が得られていない。）
- ・セメントグラウトに比べて注入設備がコンパクトであるため、作業スペースが狭小な換気立坑（直径：

4.5m）においても作業性が良いこと

- ・少なくとも5MPaの湧水圧に対しては流出抵抗性があること．さらに9MPaの水圧を作用させても、湧水抑制効果が大幅に低下することがないこと
- ・注入時間の短縮とグラウト材の希釈防止のために製作した排水・置換治具が有効であること
- ・将来的な超高压注入のために準備した超高压パッカーが9.5MPa程度まで適用可能であること

今後もパイロット孔の湧水量を継続的にモニタリングし、湧水抑制効果の継続性を確認する予定である．最後に、今後の施工上の課題としては以下の2点が挙げられる．

- ・温度上昇によるゲルタイム短縮を防止するためにグラウト冷却方法を改良すること
- ・低透水場ではグラウト流量が少なく注入効率が悪いいため、高压注入により注入効率を高めること

謝辞：今回の試験施工の実施に際してはライト工業の春山氏、大西氏、熊田氏、応用地質の下山氏に多大の協力を得た、ここに記して感謝の意を表する。

参考文献：

- 1) 原雅人，木下晴信，池田幸喜，山本勝，延藤遵：瑞浪超深地層研究所換気立坑建設工事におけるプレグラウチングの現状，第18回トンネル工学研究発表会，報告1-4，2008.
- 2) 新貝文昭，杉山博一，延藤遵：地層処分におけるグラウト技術の高度化開発（その5）—溶液型グラウト材料の適用性に関する試験—，土木学会第64回年次学術講演会，CS5-005，2009.
- 3) 杉山博一，延藤 遵，福岡奈緒美，新貝文昭，島田俊介，小山忠雄，木嶋正，寺島麗：地層処分におけるグラウト技術の高度化開発（その3）—溶液型グラウト材料の長期耐久性試験—，土木学会第65回年次学術講演会，CS7-044，2010.

TEST EXECUTION OF LIQUID-TYPE GROUT AT DEPTH OF 300M OF MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Jun NOBUTO, Masakuni TSUJI, Takashi KUSANO, Shin-ichiro MIKAKE
Akira KAMIYA and Youji ISHII

At Mizunami Underground Research Laboratory, the water inflow should be minimized, considering water treatment expense. Although cement grout has been applied to reduce water inflow up to 460m depth, water inflow through small fractures which cement grout cannot penetrate can not be neglected at deeper underground. Liquid-type grout which has high durability as well as good penetrability was therefore tested at the depth of 300m. Test results indicated that liquid-type grout could sufficiently reduce hydraulic conductivity of rock mass with less than 1Lu, and could keep improvement effect even after applied water pressure of more than 9MPa was applied.